

# APLICAÇÃO DO MODELO SCBR NO GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS: ANÁLISE DA FUNCIONALIDADE “ÁREAS REATIVAS” PARA SIMULAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE BIOESTIMULAÇÃO

Priscilla Kern<sup>1</sup>, Henry Xavier Corseuil<sup>2</sup>, Cristina Cardoso Nunes<sup>3</sup>

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

ENS – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental

Campus Reitor João D. F. Lima, Trindade – CEP 88040-970, Florianópolis (SC) – Brasil

<sup>1</sup>*priscilla.kern@gmail.com*, <sup>2</sup>*henry.corseuil@ufsc.br*, <sup>3</sup>*c.nunes@ufsc.br*

**Resumo:** O uso de tecnologias de remediação para reabilitação de áreas contaminadas exige o estudo de alternativas adequadas para a área em estudo. O modelo matemático SCBR (Solução Corretiva Baseada no Risco) é uma ferramenta de apoio à tomada de decisão em ações preventivas e no gerenciamento ambiental de áreas contaminadas. No presente trabalho foi avaliada a funcionalidade denominada “áreas reativas” do modelo SCBR para a simulação de tecnologia de bioestimulação, tendo como base um experimento de campo, que utilizou a bioestimulação ativa com nitrato, em áreas contaminadas por gasolina brasileira. No referido modelo, áreas reativas representam regiões com propriedades diferenciadas dentro do domínio de simulação, sendo possível por meio do coeficiente de biodegradação simular a tecnologia em questão. No estudo específico, as dimensões da área reativa foram escolhidas em função dos resultados do experimento de campo. No cenário-remediação simulado, foi criada uma única área reativa, utilizando-se dois coeficientes de biodegradação, em função da dinâmica de biodegradação do etanol e benzeno ao longo do processo. No primeiro momento (entre 3 a 18 meses), foi considerado apenas o coeficiente de decaimento do etanol, no valor de 4,8 ano<sup>-1</sup> e, após seu esgotamento, considerou-se o coeficiente do benzeno, entre 19 a 33 meses, no valor de 13 ano<sup>-1</sup>. A comparação entre os comprimentos de plumas simuladas e medidas em campo se deu através do conceito de amplitude de localização. As simulações para o benzeno, composto tóxico, apresentaram melhores resultados que para o etanol, quando comparadas com os resultados de campo. Nos casos onde houve divergência entre o comprimento das plumas simuladas e medidas (erro entre 2 a 4 metros), prevaleceu o cenário mais conservador, considerado como resultado positivo, onde o comprimento da pluma simulada foi superior àquele da pluma medida. Sendo assim, a funcionalidade “área reativa” do SCBR mostrou-se eficaz na retração das plumas e biodegradação dos compostos químicos durante a simulação da tecnologia de bioestimulação, oferecendo ao gestor a possibilidade de visualizar o funcionamento e a eficácia da tecnologia a ser empregada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Águas subterrâneas, bioestimulação, SCBR, áreas reativas.

## INTRODUÇÃO

Um dos mais graves problemas, envolvendo derivados de petróleo, está relacionado à poluição dos recursos hídricos, e à contaminação de aquíferos que são usados como fontes de abastecimento de água para o consumo humano. Dado o crescente número de contaminações e a necessidade do emprego de tecnologias de remediação para reduzir o impacto das contaminações (CETESB, 2015), os modelos matemáticos desempenham um papel importante para avaliar a eficiência das mesmas. O modelo matemático SCBR simula tecnologias de

remediação como barreiras físicas, bombeamentos e cubagem. Além disso, a funcionalidade “áreas reativas” permite simular processos de bioestimulação. As áreas reativas representam regiões com propriedades diferenciadas dentro do domínio de simulação, sendo possível por meio do coeficiente de biodegradação (coeficiente de decaimento ou meia vida), simular uma bioestimulação.

Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a funcionalidade denominada “áreas reativas” do modelo matemático SCBR (Solução Corretiva Baseada no Risco) para simulação de tecnologias de bioestimula-

ção, em áreas contaminadas por gasolina brasileira, tendo como base um experimento de campo de bioestimulação ativa com nitrato. Para tal será necessário calibrar o fluxo subterrâneo para a área em estudo; calibrar o transporte das plumas de etanol e benzeno após criação de áreas reativas por meio do coeficiente de biodegradação; avaliar o comprimento das plumas (etanol e benzeno) simuladas no SCBR comparadas com o comprimento das plumas obtido através dos dados de campo.

## METODOLOGIA

### • Local

O experimento de bioestimulação anaeróbia, que será utilizado como base para configuração da ferramenta “área reativa” do modelo matemático SCBR, foi realizado em escala real, na área experimental II da Fazenda da Ressacada, de propriedade da Universidade Federal de Santa Catarina. A fazenda experimental esta localizada no sul da Ilha de Santa Catarina, na região da Tapera, próxima ao Aeroporto Hercílio Luz, no município de Florianópolis. A Figura 1 mostra uma imagem aproximada da localização dos poços, com todos os poços de monitoramento já instalados na região do experimento de bioestimulação ativa.

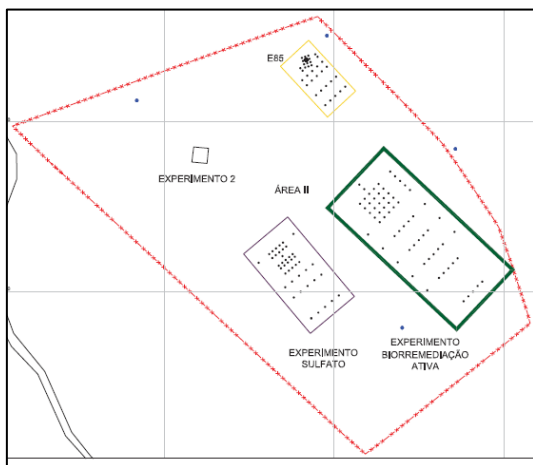


Figura 1: Planta da área experimental II da fazenda Ressacada

### • Características Hidrogeológicas

Para definição das condições de contorno, o aquífero foi considerado como sendo livre e heterogêneo e que o escoamento se

desenvolve em regime permanente (estado estacionário).

No experimento de campo, na profundidade de 2,3m, aos 25 meses, as concentrações de etanol já eram inferiores a 10mg/L nas águas subterrâneas. Como o valor de corte para o etanol foi de 10mg/L, pode-se considerar que ocorreu esgotamento do etanol no meio monitorado. O primeiro nível (2,3), foi o único nível onde houve a exaustão do etanol, acelerada pela bioestimulação com nitrato. Sendo assim, a caracterização da área para a simulação foi feita sempre utilizando-se os dados referentes ao primeiro nível (2,3m).

A condutividade local adotada foi medida nos pontos mais próximo da área do experimento de bioestimulação, a Tabela 1 apresenta os pontos de análises, suas coordenadas e respectivas condutividades, medidas em 2007. A porosidade total e efetiva do solo da área experimental foi de 40% e 15% respectivamente. O gradiente hidráulico médio do local se considerarmos apenas a condutividade do PE02, ponto mais próximo a área do experimento, é 0,6%.

Tabela 1: Valores medidos de condutividade hidráulica do solo.

Nome	Posição x (m)	Posição y (m)	Condutividade Hidráulica (cm/s)
PE02	743435,0	6935842,9	4,25E-04
PE03	743341,2	6935857,1	3,42E-04
PZ01	743397,2	6935876,3	3,14E-04
PZ03	743419,3	6935790,2	6,67E-04
PZ05	743312,8	6935840,3	2,60E-04

Todos os dados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 serão utilizados como dados de entrada do modelo matemático SCBR para caracterizar o solo nas proximidades da área do experimento.

Tabela 2: Dados de entrada do Modelo SCBR

Dispersividade	Longitudinal	0,12 m
Densidade do solo		1700 Kg/m <sup>3</sup>
Carbono Orgânico		0,06 %
Porosidade Efetiva (nível superior)		0,15%

A

Tabela 3 apresenta os valores de carga hidráulica especificados em cada ponto de análise adotado, todas as medidas foram realizadas no dia 19/11/04.

Tabela 3: Carga hidráulica utilizada nas simulações

Nome	Posição x (m)	Posição y (m)	C.H. (m)
PE01	743410,0	6935750,3	3,713
PE02	743435,0	6935842,9	3,793
PZ01	743397,2	6935876,3	4,119

- **Calibração do Modelo SCBR**

A calibração do modelo é uma etapa fundamental da simulação, pois determina a precisão das predições realizadas com o modelo. Auxiliando na redução das incertezas inerentes a uma representação simplificada de um sistema real e complexo. Assim, os parâmetros hidrogeológicos e as condições de contorno são ajustados para que as cargas hidráulicas simuladas no modelo sejam semelhantes às observadas no sistema real. Será efetuada uma análise residual dos dados de carga hidráulica simulados, de acordo com o recomendado pelas normas ASTM D5981-96 (2008).

- **Inserção da fonte do produto gasolina brasileira no SCBR**

O volume de gasolina comercial brasileira utilizado neste experimento foi o mesmo dos trabalhos de Fernandes (2002), Schneider (2005) e Nunes (2006), em estudos de atenuação natural monitorada (ANM), visando assim possibilitar a comparação entre o uso da bioestimulação na degradação dos compostos BTEX em relação à estratégia passiva de biorremediação (ANM) em casos de derramamento de gasolina brasileira. (COSTA, 2008).

A fonte de gasolina comum brasileira **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, contendo aproximadamente 25% de etanol, possui uma área de 1m<sup>2</sup>, aproximadamente, onde o solo foi escavado até a profundidade de 1m a partir da superfície do solo. Em 22 de dezembro de 2004, foram liberados ao nível do lençol freático 100 litros de gasolina comum contendo, aproximadamente, 25% de etanol.

Neste trabalho, serão simulados os compostos etanol, benzeno e nitrato de sódio. A biodegradação dos BTEX em ambientes de subsuperfície está integralmente relacionada a biodegradação do etanol (Costa, 2006), como no experimento de campo ocorreu o esgotamento do etanol no primeiro nível do solo, é fundamental que este composto seja simulado. O benzeno será simulado, pois é considerado o mais tóxico dentre os BTEX por se tratar de um composto carcinogênico, com padrão de potabilidade de 5mg.L<sup>-1</sup> (MS, 2004).

- **Coefficiente de retardo do benzeno e etanol para a área de estudo**

Ainda que o modelo matemático SCBR calcule o retardo, pela equação abaixo, os valores dos coeficientes de partição (K<sub>oc</sub>) existente no banco de dados do SCBR (versão 3.2), referente à última atualização, (Fonte: EPA, 2014), tanto para o benzeno (145,8 L/Kg), como para o etanol (1,19), geraram valores muito elevados de retardo não condizentes com os processos observados em campo. Desta forma, optou-se por utilizar o valor de K<sub>oc</sub>, para o benzeno disponível no banco de dados das planilhas CETESB para avaliação de risco. Sendo assim,

$$R = 1 + \frac{\rho_b \cdot K_d}{\eta_e} \quad (1)$$

$$R_{benzeno} = 1,42$$

$$R_{etanol} = 1,00$$

- **Injeção de Nitrato e Dimensão da Área Reativa**

Segundo o trabalho de Costa (2008), a injeção de nitrato de sódio, visou acelerar o processo de biodegradação natural na água subterrânea, aumentando assim, a velocidade de degradação do etanol e dos hidrocarbonetos de petróleo, iniciou no dia 21 de fevereiro de 2005 (2,5 meses após o derramamento de gasolina). Através da massa de nitrato injetada e do volume da fonte de contaminação foi possível calcular a concentração medida na fonte de 955,5mg/L.

Tabela 4: Configuração da Fonte de Nitrato

Fonte	Produto simulado	Área	Espessura
Nitrato	Nitrato de Sódio	6,0 m <sup>2</sup>	2,0 m
<b>Coordenadas da Fonte</b>			
(743406,37;6935830,77);			
(743408,70;6935832,82);			
(743409,89;6935831,27);			
(743407,76;6935829,26)			

- **Configuração de Cenários**

Para avaliação da tecnologia de simulação aplicada, trabalhou-se com um cenário-controle, onde não foi utilizado nenhum tipo de remediação ou biodegradação dos compostos em análise e um cenário-remediação, com a aplicação da tecnologia de remediação.

No cenário-remediação, foi inserida uma única área reativa, os coeficientes de decaimento dos compostos serão variados ao longo do tempo de simulação, através das intervenções, sendo assim, valor do coeficiente representa uma “média” entre o coeficiente encontrado na fonte e nas plumas. A configuração da área reativa deve considerar a área de abrangência das plumas de etanol/benzeno, onde deve ocorrer o processo de biodegradação. Sendo assim, as dimensões da área reativa para este cenário foram adotadas a partir do maior comprimento de pluma (etanol/benzeno) obtido em campo.

Em ambos cenários foram simulados 100 litros de gasolina comercial brasileira, assim como no experimento de campo, seguindo o modelo de fonte tipo caixa. Conforme explicitado anteriormente, a simulação foi realizada apenas para o nível 2,3 m, sendo assim, caracterizou-se o ambos os cenários com as características hidrogeológicas referentes ao nível superior (2,3m).

- **Avaliação da funcionalidade “Áreas Reativas”**

A avaliação da funcionalidade “áreas reativas” foi realizada pela comparação entre o comprimento de pluma dos compostos simulados e medidos. O resultado dos comprimentos de pluma do experimento de campo (medido) é verificado em função da detecção dos compostos químicos nos po-

ços de monitoramento que estão a uma distância fixa da fonte. Assim a comparação entre os comprimentos de pluma do experimento de campo e das simulações, levou em consideração a distância entre os poços de monitoramento, optando-se por utilizar amplitudes de distância. A amplitude foi definida como a distância entre o PM onde a concentração medida foi maior que o valor de corte e o PM onde não foi detectado o composto. O erro foi identificado comparando-se as duas amplitudes, amplitude simulada e amplitude medida, sendo verdadeiro (V) se as amplitudes coincidem e falso (F), sem caso contrário. A estimativa do erro foi obtida a partir dos limites das amplitudes, subtraindo-se o limite superior da amplitude medida da simulada. Nos casos de não coincidência de comprimento de plumas, foi atribuído um sinal positivo (+) para o erro quando o comprimento da pluma simulada foi superior à pluma medida em campo, e um sinal negativo (-) em caso oposto.

Para a avaliação do comprimento de plumas, os passos temporais utilizados foram selecionados a partir das coletas realizadas em campo, e, dentre elas, selecionou-se as coletas onde o valor medido foi maior que o valor de corte adotado para cada composto.

Para comparação das plumas elaboradas com os valores de campo (Costa, 2008) e as plumas simuladas com o modelo matemático, os passos temporais escolhidos foram os mesmos do experimento de campo (10, 17, 25 e 32 meses).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

- **Calibração do Modelo SCBR**

A partir da análise residual efetuada, considerou-se o modelo como calibrado, pois o valor do quociente entre desvio padrão e amplitude é significativamente inferior a 15%, conforme indicado por Anderson e Woessner (1992). Isto vai ao encontro do estabelecido pelas normas ASTM, que indicam que os valores dos resíduos devem tender a zero, mas que a análise fica a critério do profissional responsável pela calibração. A Tabela 5, que mostra os resumos das análises dos resultados da análise residual.

Tabela 5: Análise residual dos valores simulados.

Análise efetuada	19/12/2004
Amplitude	4,06E-01
Média Residual	3.08E-04
Desvio Padrão	6.20E-04
Média Residual Absoluta	4.51E-04
Soma dos Quadrados dos Resíduos	1.05E-06
Resíduo Mínimo	0,000145367
Resíduo Máximo	0.000145367
Quociente (Desvio Padrão/Amplitude)	0,15%
Quociente (Média Residual Absoluta/Amplitude)	0,11%

- **Fluxo**

Para melhor entender como é a direção do fluxo na região do estudo foi elaborado um mapa potenciométrico e de velocidades (Figura 2).

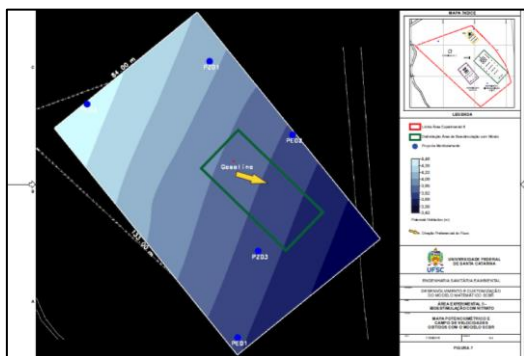


Figura 2: Mapa potenciométrico e campo de velocidades obtidos com o modelo SCBR.

O mapa de condutividade hidráulica simulado com o modelo SCBR (Figura 3) indica uma maior condutividade ( $6,67 \times 10^{-4} \text{ cm.s}^{-1}$ ) na região sudoeste da área do experimento de bioestimulação com nitrato, em comparação com a região nordeste da área (aproximadamente  $4,25 \times 10^{-4} \text{ cm.s}^{-1}$ ), ou seja, o fluxo da água subterrânea tende a fluir com maior velocidade nesta região.

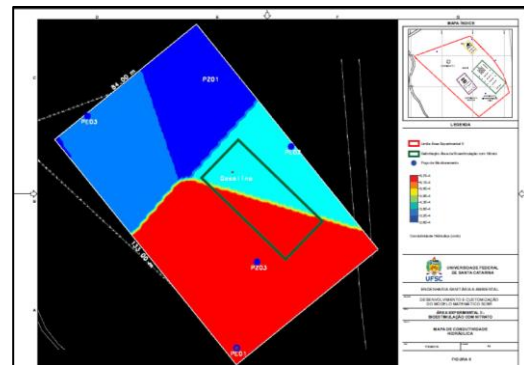


Figura 3: Mapa das condutividades hidráulicas obtidos com o modelo SCBR.

- **Caracterização e simulação dos cenários**

No cenário-controle, foi inserida apenas a fonte de gasolina. A Figura 4 e Figura 5, apresentam as plumas simuladas de etanol e benzeno, respectivamente, simuladas sem remediação. Nas figuras é possível confirmar que caso não houvesse ocorrido a bioestimulação com nitrato as plumas de ambos os compostos (etanol e benzeno) teriam dimensões muito maiores, sendo que a pluma de etanol não se esgotaria e a de benzeno não sofreria retração até os 33 meses (tempo de total da simulação).

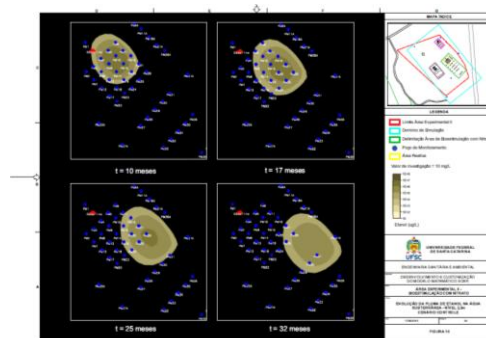


Figura 4: Evolução da pluma de etanol no cenário-controle simulada no modelo SCBR.

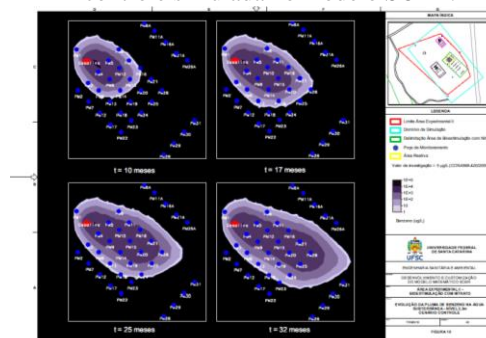


Figura 5: Evolução da pluma de benzeno no cenário-controle simulada no modelo SCBR.

No cenário-remediação foram realizadas duas intervenções, a primeira no segundo mês de simulação, onde foi inserida fonte de nitrato de sódio e a área reativa, neste primeiro momento apenas o coeficiente de biodegradação de etanol foi alterado. No, 18º mês alterou-se o coeficiente de biodegradação do benzeno, devido ao esgotamento do etanol. As configurações alteradas na área reativa em cada intervenção encontram-se na Tabela 6.

O processo foi utilizado somente para o primeiro nível, 2,3 m, pelos motivos expostos na metodologia (características hidrogeológicas). A alteração do coeficiente de biodegradação do benzeno deve-se ao fato que segundo Costa (2008) enquanto o etanol estava presente na água subterrânea com concentrações superiores a 10 mg.L<sup>-1</sup> (10 a 17 meses), a pluma de benzeno apresentou avanço contínuo na área experimental no nível 2,3m, entre o 18º e 25º mês quando a concentração de etanol tornou-se inferior a 10 mg.L<sup>-1</sup>, a pluma de benzeno apresentou retração. A retração da pluma de benzeno se deve à biodegradação deste, estimulada pela grande diminuição na concentração de etanol na água subterrânea.

Tabela 6: Coeficientes de decaimento inseridos na "área reativa"

Intervenção	Tempo (meses)	k-etanol (ano <sup>-1</sup> )	k-benzeno (ano <sup>-1</sup> )
1	3-18	4,8	-
2	19-33	-	13

- **Intervenções**

#### *Intervenção 1*

A primeira intervenção foi realizada no passo temporal 2, ou seja, a intervenção irá alterar o cenário partir do 3 mês de simulação. Na primeira intervenção foi inserida a fonte de nitrato, com 8857,27L cujas configurações estão disponíveis na

Tabela 4. Para simular a tecnologia de remediação foi inserida uma área reativa. Em função dos dados de campo obtidos, é possível calibrar a biodegradação dentro da área reativa, em função dos resultados do

experimento realizado. Dado que a opção escolhida foi trabalhar com uma única área reativa, a configuração da área reativa teve que considerar a área de abrangência das plumas de etanol/benzeno, onde deve ocorrer o processo de biodegradação. Sendo assim, as dimensões da área reativa foram adotadas a partir do maior comprimento de pluma (etanol/benzeno) obtido em campo.

Os coeficientes de biodegradação do etanol foram ajustados para calibrar a área reativa a fim de obter o esgotamento do etanol no mesmo espaço temporal daquele ocorrido no experimento de campo. Segundo as análises do Laboratório Rema, o esgotamento do etanol, no primeiro nível (2,3 m), considerando o valor de corte de 10mg/L ocorreu entre o 17º e o 25º mês. Para tal, o valor do coeficiente de decaimento do etanol na área reativa na primeira intervenção, ou seja, do 3º ao 18º mês foi de 4,8 (ano<sup>-1</sup>). Considerando que quanto mais rápido ocorrer a biodegradação do etanol e sua completa retirada da área experimental mais cedo os hidrocarbonetos monoaromáticos serão biodegradados (COSTA, 2006), no primeiro momento não foi inserido um valor para o coeficiente de decaimento do benzeno na área reativa, visto que ainda havia a presença do etanol.

#### *Intervenção 2*

Após o esgotamento do etanol, adotou-se como coeficiente de decaimento do benzeno na área reativa o valor de 13 ano<sup>-1</sup>, valor obtido por tentativa e erro para igualar a pluma de benzeno da simulação à pluma no experimento de campo.

- **Análise distribuição espacial das plumas**

A fim de avaliar a aplicabilidade das áreas reativas para simular a tecnologia de remediação bioestimulação com nitrato, comparou-se os comprimentos de pluma do etanol e benzeno conforme explanado no item avaliação da funcionalidade "Áreas Reativas".



**Etanol**

O valor de corte adotado para as plumas de etanol foi de 10mg/L, o qual representou o esgotamento do etanol no primeiro nível (2,3 m) do meio monitorado. No experimento de campo. Segundo Costa (2008), na profundidade de 2,3m pluma de etanol avançou 6 metros no período entre 10 e 32 meses (Figura 6 e Figura 7). Aos 25 meses, as concentrações de etanol já eram inferiores a 10 mg.L<sup>-1</sup> nas águas subterrâneas.

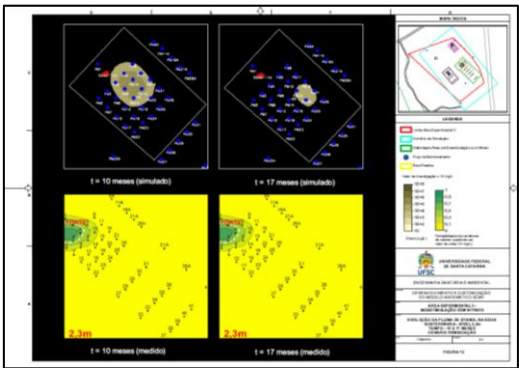


Figura 6: Comparação da evolução da pluma de etanol no cenário remediação simulado com a distribuição espacial do etanol no experimento de campo (tempo 10 e 17 meses).

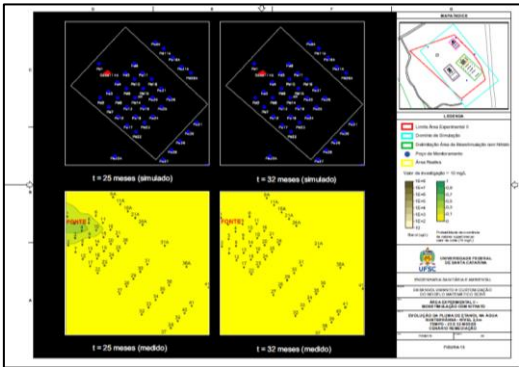


Figura 7: Comparação da evolução da pluma de etanol no cenário remediação simulado com a distribuição espacial do etanol no experimento de campo (tempo 25 e 32 meses).

A comparação do comprimento das plumas de etanol (Tabela 7: Análise da amplitude de detecção entre a pluma de etanol medida em campo e simulada.Tabela 7) identificou que para os cinco passos temporais comparados (4, 6, 14, 17 e 26 meses), somente no tempo 26 meses o comprimento da pluma coincidiu, sendo para os demais tempos a pluma simulada superior em comprimento que a medida. O fato do compri-

mento de pluma simulado ser superior ao medido é positivo, visto que o modelo busca apresentar sempre o cenário conservador por questões de segurança.

Os resultados da comparação da distância das plumas medidas em campo com a distância das plumas simuladas de etanol e benzeno no modelo encontram-se nas Tabela 7 e Tabela 8 respectivamente.

Tabela 7: Análise da amplitude de detecção entre a pluma de etanol medida em campo e simulada.

Etanol				
Tempo (meses)	Amplitude em campo (m)	Amplitude na simulação (m)	Coincidem? (V/F)	Erro (m)
4	2-4	4-6	F	+2
6	2-4	6-8	F	+4
14	4-6	8-10	F	+4
17	6-8	8-10	F	+2
26	0	0	V	0

No mapa de distribuição do etanol, realizados por Costa (2008), a área com probabilidade superior a 50 % é delimitada por uma linha tracejada azul, referente às concentrações superiores ao valor de corte (10 mg/L). Quanto mais próximo de 1 (vermelho) maior a probabilidade da concentração estar acima do valor de corte definido para a variável analisada, enquanto que mais próximo de zero (amarelo) menor a probabilidade de ocorrência de valores de concentração superiores ao valor de corte. Sendo assim, aos 25 meses, apesar do mapa apresentar a pluma de etanol, já havia ocorrido seu esgotamento segundo as análises realizadas em laboratório. A probabilidade da área em estudo apresentar alguma concentração superior ao valor de corte é inferior a 50%. Destaca-se que no experimento realizado em campo, em nenhum momento no nível 2,3 m a pluma do etanol se separou da fonte, já no modelo, aproximadamente no 8º mês ocorreu a separação do etanol da fonte de contaminação. A simulação adotada apresentou como resultado o cenário mais conservador, obtendo-se para todos os tempos medidos, o limite da pluma simulada a dois ou quatro metros a jusante do limite da pluma medida.

## Benzeno

O mesmo procedimento foi aplicado para o benzeno, sendo o valor de corte do benzeno, 5ug/L foi escolhido com base no padrão de potabilidade estabelecido pela portaria 518 do Ministério da Saúde de 2004.

Tabela 8: Análise da amplitude de detecção entre a pluma de benzeno medida em campo e simulada.

Benzeno				
Tempo (meses)	Amplitude em campo (m)	Amplitude na simulação (m)	Coincidem? (V/F)	Erro (m)
4	2-4	4-6	F	2
6	2-4	4-6	F	2
10	4-6	6-8	V	2
14	4-6	8-10	F	4
18	10-16	10-16	V	0
25	10-16	10-16	V	0
33	2-4	2-4	V	0

No experimento de campo aos primeiros 10 meses, as concentrações de benzeno, superiores ao valor de corte, eram observadas principalmente na região da fonte de contaminação. No nível de 2,3 metros a pluma de benzeno avançou de 4 metros (10 meses) para 10 metros à jusante da fonte aos 25 meses (**Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**). No período entre 25 e 32 meses, no entanto, a pluma de benzeno retraiu para 4m. O comportamento das plumas de benzeno em campo indicou que o benzeno sofreu biodegradação na água subterrânea no período entre 10 e 32 meses. Segundo Costa (2008) o maior avanço das plumas de benzeno relativamente a dos demais hidrocarbonetos monoaromáticos (tolueno, etilbenzeno e xilenos - TEX) e do etanol, entre 10 e 25 meses, evidenciou o caráter recalcitrante do benzeno e a utilização preferencial do etanol durante a bioestimulação, quando o nitrato foi o principal receptor de elétrons. O comportamento do benzeno pode ser justificado pela inibição da sua biodegradação na presença dos TEX

e do etanol quando o nitrato é o receptor de elétrons (CORSEUIL et al., 1998).

Enquanto o etanol estava presente na fonte, a biodegradação dos compostos BTEX foi inibida, determinando que a cinética de intemperização fosse lenta, sem influência do processo de biodegradação. Após este período, a elevada biomassa remanescente na fonte, decorrente da biodegradação do etanol, passou a utilizar os hidrocarbonetos do petróleo disponíveis na fonte como substrato principal, acelerando o processo de dissolução e a intemperização da fonte (SCHNEIDER, 2005). O esgotamento do etanol, no nível 2,3 m, ocorreu entre o 17º e o 25º mês, sendo assim, a biodegradação do benzeno na área reativa da simulação só foi ativada a partir do 18º mês (Tabela 6). A partir do momento em que foi alterado o coeficiente de decaimento do benzeno na simulação houve grande redução na evolução da pluma e no 22º mês ocorreu o início da retração da mesma. Como pode ser verificado na Tabela 8, os erros da simulação da pluma de benzeno no SCBR foram inferiores àqueles da simulação do etanol. Para os meses, 4, 6, 10 e 14, a diferença foi de 2 metros, e para os meses 14, 18, 25 e 33 meses, as plumas simuladas e medidas tiveram o mesmo comprimento.

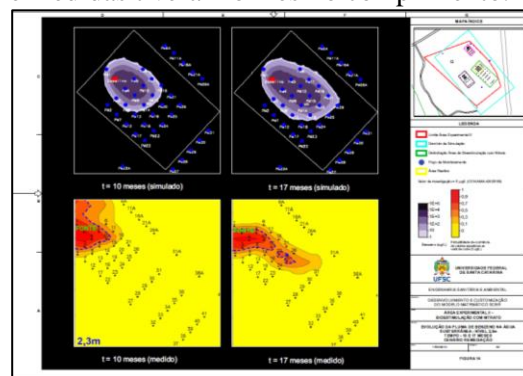


Figura 8: Comparação da evolução da pluma de benzeno no cenário remediação simulado com a distribuição espacial do etanol no experimento de campo (tempo 10 e 17 meses)



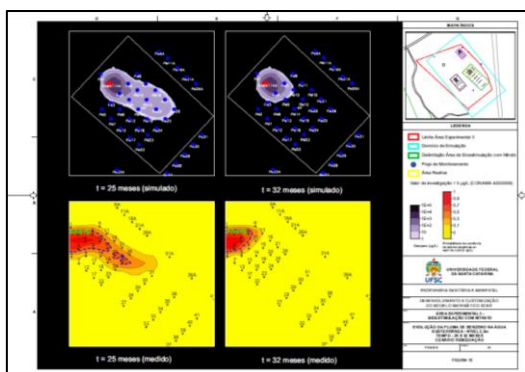


Figura 9: Comparação da evolução da pluma de benzeno no cenário remediação simulado com a distribuição espacial do etanol no experimento de campo (tempo 25 e 32 meses)

- **Análise da funcionalidade das áreas reativas**

A funcionalidade “área reativa” do SCBR mostrou-se eficaz na retração e biodegradação das plumas. Os coeficientes de decaimento encontrados para o etanol e benzeno,  $4,8 \text{ ano}^{-1}$  e  $13 \text{ ano}^{-1}$ , respectivamente, podem variar de acordo com as características hidrogeológicas do local e a dimensão do acidente.

No estudo específico, o tamanho da área reativa foi escolhido em função dos resultados apresentados por Costa (2008). Em casos reais, onde não é conhecido o comprimento das plumas *a priori*, recomenda-se utilizar o comprimento de plumas obtido pela simulação dos compostos químicos em análise para configurar na área reativa, sem biodegradação e sem remediação e em casos das simulações ultrapassarem o limite do estabelecimento, utilizar o limite do estabelecimento como limite da área reativa.

- **Gestão de áreas contaminadas**

Para a aplicação da funcionalidade áreas reativas em áreas contaminadas com gasolina brasileira são necessárias as seguintes etapas: simulação do fluxo subterrâneo, em função das características hidrogeológicas da área, simulação dos compostos (benzeno/etanol) derramados, verificação do comprimento máximo de pluma de ambos e configuração da área reativa. A simulação deve ser realizada sem biodegradação, com o retardo calculado pelo modelo SCBR. Como o comprimento de pluma simulada sem biodegradação e sem remedi-

ação será consideravelmente superior ao real, no caso das plumas ultrapassarem os limites do empreendimento, uma das alternativas para estimar o tamanho da área reativa a ser simulada, pode ser os limites do empreendimento. Após a configuração da área reativa, estimar o coeficiente de decaimento do etanol na área reativa através de uma intervenção e manter o valor do coeficiente até que o etanol se esgote, quando ocorrer o esgotamento inserir uma nova intervenção e alterar o valor do coeficiente de decaimento do benzeno.

## CONCLUSÕES

Este estudo avaliou a funcionalidade denominada “áreas reativas” no modelo matemático SCBR (Solução Corretiva Baseada no Risco) para simulação de tecnologias de bioestimulação, em áreas contaminadas por gasolina brasileira, tendo como base um experimento de campo de bioestimulação ativa com nitrato. As principais conclusões foram:

- ✓ A funcionalidade “área reativa” do SCBR mostrou-se eficaz na retração das plumas e biodegradação dos compostos químicos simulados da gasolina brasileira, tendo sido utilizados para as condições hidrogeológicas em estudo os coeficientes de decaimento encontrados para o etanol e benzeno,  $4,8 \text{ ano}^{-1}$  e  $13 \text{ ano}^{-1}$ , respectivamente.
- ✓ A comparação entre o comprimento de pluma simulado e medido utilizou o conceito de amplitude de localização, o qual permitiu de forma efetiva avaliar o resultado do modelo para a tecnologia avaliada.
- ✓ O uso do conceito amplitude de localização se mostrou mais efetivo do que a comparação através das concentrações medidas no caso de reduzidas malhas amostrais.
- ✓ A estimativa de erro identificou que o comprimento de pluma do modelo matemático foi mais conservador que o caso real, sendo a maior diferença identificada entre o comprimento de pluma simulado e medido de 4 metros, tanto para o benzeno quanto para o etanol.

- ✓ As plumas simuladas foram superiores as medidas em campo, o erro foi considerado positivo, visto o modelo conservador.
- ✓ A idade da fonte é relevante para a escolha do receptor de elétrons a ser utilizado na injeção. O nitrato é utilizado apenas para vazamentos recentes, estando outros receptores, como o sulfato disponível para vazamentos mais antigos. Análises hidrogeoquímicas da área impactada são relevantes para caracterizar o processo de biodegradação em curso.
- ✓ A simulação da pluma do receptor de elétrons permite verificar se ocorre a sua sobreposição com a pluma de etanol, para que ocorra a biodegradação.
- ✓ O usuário do modelo deverá estimar a massa teórica do receptor de elétrons com base na relação estequiométrica de biodegradação dos doadores de elétrons (BTEX e etanol).
- ✓ Os coeficientes de decaimento nas áreas reativas dependem não só do volume derramado, como também da hidrogeologia local e biodisponibilidade do receptor de elétrons utilizado no meio subterrâneo.
- ✓ Com a funcionalidade área reativa, o gestor pode avaliar o coeficiente de biodegradação proposto pela empresa de remediação, e com a funcionalidade intervenção, iniciar o processo de remediação, considerando o tempo já decorrido após o derramamento.
- ✓ A aplicação da funcionalidade “áreas reativas” no modelo matemático SCBR, pode ser considerada uma alternativa tecnológica para avaliar a utilização de processos de bioestimulação na gestão de áreas contaminadas, visando auxiliar o gestor no processo decisório.

## RECOMENDAÇÕES

- Realizar outras simulações com base em outros experimentos de campo de bioestimulação para validar o uso da funcionalidade “áreas reativas”, o uso

das intervenções e avaliar os coeficientes de decaimento nas áreas reativas.

- Aplicar melhorias na funcionalidade intervenções do SCBR, a fim de possibilitar não só o salvamento da posição dos elementos do ambiente, como áreas reativas, a fim de evitar a repetição das simulações quando são necessárias alterações nos coeficientes de biodegradação, como também permitir a inserção de novas fontes durante o processo de intervenção, cujos compostos químicos não foram simulados anteriormente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CETESB. - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **O gerenciamento de áreas contaminadas no Estado de São Paulo. Cadastro de áreas contaminadas e reabilitadas no Estado de São Paulo.** 2015
- COSTA, A. H. **Bioestimulação com Injeção de Nitrato em Águas Subterrâneas Impactadas por Derramamento de Gasolina com Etanol.** Florianopolis. xvii. 248 f., 2008.